

2. Показано, что прямое выдавливание с раздачей приводит к существенному снижению усилий и удельных усилий выдавливания. При получении прямоугольного профиля диаметр исходной заготовки в 1,4 раза меньше по сравнению с традиционным выдавливанием. Причиной уменьшения усилий является изменение схемы напряженного состояния в очаге деформации, которое приводит к уменьшению по абсолютной величине гидростатического давления.

3. Установлено влияние угла конусности матрицы на усилие выдавливания с раздачей и заполнение прямоугольного профиля матрицы. Минимальное усилие имеет место при угле матрицы 20 градусов. Полное заполнение профиля обеспечивают малые углы матрицы (10 и 20 градусов).

4. Расчетным и экспериментальным путем установлено, что использование прямого выдавливания с раздачей взамен традиционного при получении т-образного профиля из круглой заготовки приводит к снижению усилия выдавливания в 1,9 раза.

**Список литературы.** 1. *Ковка и штамповка*: Справочник. В 4-х т/Ред. Совет: Е.И. Семенов (предс.) и др.// –М.: Машиностроение, 1987- т.3. 2. Холодная объемная штамповка /Под ред. Г.А. Навроцкого.// 1987. –384 с. 3. *Береснев Б.И.* Физические основы и практическое применение гидроэкструзии./ *Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В.* // М.: Наука, 1981. – 240 с. 4. *Черный Ю.Ф.* Гидропрессование инструментальных сталей. / *Черный Ю.Ф., Спужанюк В.З., Лядская А.А. и др.* // К: Техника, 1987. – 217 с. 5. *В.А. Белошенко.* Теория и практика гидроэкструзии./ *В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спужанюк.* // К.: Наукова думка, 2007. – 246 с. 6. *А.с. 1738409. СССР. МКИ В 21j13/04* Способ выдавливания фасонных изделий. 7. *Калюжний В.Л.* Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів./ *Калюжний В.Л., Калюжний О.В., Горностай В.М Крижанівська І.Я.*// Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, № 1(20) – 2009, Краматорск, ДГМА. – С. 67-75.

Надійшла до редколегії 17.10.2012

УДК 621.777.4

**Прямое холодное выдавливание с раздачей профилей из сталей.** / *Горностай В.Н.*// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 110–115. – Библиогр.: 7 назв.

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований процессов традиционного холодного прямого выдавливания та выдавливания с раздачей прямоугольных профилей из сталей. При выдавливании с раздачей достигнуто существенное снижение усилий выдавливания и удельных усилий на деформирующем инструменте.

**Ключевые слова:** прямое выдавливание, силовые режимы, удельные усилия, угол матрицы, коэффициент раздачи, профили.

The theoretical analysis and experimental investigation of traditional straight cold extrusion and extrusion with dispensing are presented. The significant dropping of load of extrusion and dropping of specific load on deforming tool are obtained during extrusion with dispensing.

**Keywords:** straight extrusion, load modes, specific load, die angle, dispensing ratio, profile.

УДК 621.721.01

**С. В. ЕРШОВ**, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, Днепродзержинск,  
**С. Н. МЕЛЬНИК**, канд. техн. наук, гл. калибровщик, ПАО ДМКД,  
Днепродзержинск,  
**С. Ю. ГАВРИЛИН**, аспирант, ДГТУ, Днепродзержинск.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ФАСОННОЙ ПОЛОСЫ В ЧЕРНОВОМ ШПУНТОВОМ КАЛИБРЕ

Шпунтовые сваи работают как консольные балки, нагруженные рассредоточенными силами. Основную нагрузку воспринимает полотно профиля. Суммарное воздействие сил создаёт изгибающий момент, под действием которого сваи могут деформироваться. Это приводит к разъединению свай в замковых эле-

© С. В. Ершов, С. Н. Мельник, С. Ю. Гаврилин, 2012

ментах. Поэтому при производстве шпунтов особое внимание уделяют выполнению замковых элементов. Выполнено сопоставление экспериментальных и теоретических данных о течении металла. Показаны отличия течения металла на различных этапах заполнения металлом очага деформации.

**Ключевые слова:** деформация, калибр, замковой элемент, формоизменение

**Введение:** Шпунтовое ограждение служит водонепроницаемой преградой, которая удерживает грунт от обрушения при возведении строительных конструкций. Шпунтовое ограждение может использоваться в тех случаях, когда невозможно произвести раскопку котлована с устройством естественного откоса, например в неустойчивых грунтах, при обустройстве набережных, при большой проектной глубине котлованов, а также в стесненных условиях.

Большим спросом пользуется шпунтовое ограждение с использованием металлического профиля шпунтовой сваи типа «Ларсен». Данный профиль, представляет собой П-образный контур с замковыми элементами на краях боковых стоек (фланцах).

**Анализ последних исследований и литературы:** Шпунтовые сваи типа Ларсен авторы работы [1] относят к профилям корытного типа с вертикальной осью симметрии и отогнутыми краями. Прокатка профилей данной группы осуществляется на крупносортовых, рельсобалочных и универсально-балочных станах. К профилям данной группы можно отнести: профиль шпунтовой сваи типа «Ларсен», профиль железнодорожной шпалы и профили для крепления горных выработок – СВП, а также близкий по форме стандартный швеллерный профиль.

К конструкции рассматриваемых профилей предъявляют особые требования, а именно: повышенный момент сопротивления, возможность работы профилей на изгиб.

Отличие стандартного швеллерного профиля от профилей СВП, профиля железнодорожной шпалы и шпунтовой сваи типа «Ларсен» заключается в отсутствии замковых (кулачковых) элементов. Сходство заключается в выборе общих способов прокатки – корытный, балочный.

Для корытных профилей и стандартного швеллера проводились экспериментальные и теоретические исследования многими учеными. В работе [2] исследовались коэффициент утяжки и были получены формулы для определения заполнения калибра. В работе [3] рассмотрены экспериментальные данные по прокатке в разрезных калибрах со свободным и стесненным уширением. Основным принципом калибровки валков для сложных профилей является обеспечение одинаковых вытяжек по элементам калибра. При этом важным фактором является деление калибра на элементы, что было показано в работе [4].

Исследования формоизменения при прокатке шпунтовых профилей корытного типа, как правило, носят экспериментальный характер. В работах [5 – 8] были рассмотрены особенности заполнения сложного разрезного калибра, влияние защемления на формоизменение металла, получены закономерности течения металла в черновых шпунтовых калибрах, рассмотрена степень влияния коэффициента обжатия и соотношения площадей на параметры деформированного состояния.

Однако до настоящего времени в технической литературе отсутствуют теоретические исследования течения металла при прокатке фасонной полосы в черновых шпунтовых калибрах. Это затрудняет анализ поэтапного заполнения металлом очага деформации при прокатке фасонной полосы в черновых шпунтовых калибрах. Что в свою очередь не дает возможности оценить полную картину течения металла в очаге деформации.

**Цель исследования, постановка проблемы.** Первой целью работы является анализ формоизменения металла на различных этапах заполнения металлом очага деформации. Второй целью работы является сопоставление экспериментальных и теоретически полученных данных о течении металла в качественном виде.

**Материалы исследований.** Для рассмотрения качественной картины течения металла в исследуемых калибрах было решено провести два исследования течения металла – экспериментальное и теоретическое.

Для проведения экспериментального исследования решено взять за основу схему деформации, а также геометрические размеры подката, аналогичные данным работы [7]. Был отлит в изложницу свинцовый образец. Образец был разрезан пополам и на одну из половин, в поперечной плоскости, была нанесена координатная сетка с размером ячейки  $2 \times 2$  мм. Затем обе половинки были спаяны с помощью сплава Вуда. Полученный образец прокатывался в шпунтовом черновом калибре по схеме деформации, соответствующей рис. 1. Прокатку проводили на обезжиренных валках с абсолютным обжатием по стенке 9,4 мм. До и после прокатки был выполнен замер координатной сетки, а также геометрических размеров (табл.) поперечного сечения полосы. Замер координат узлов сетки проводили принимая за начало координат точку  $O(0;0)$ , которая совпадает с геометрическим центром поперечного сечения фасонной полосы. Узлы координатной сетки обозначали двумя индексами:  $i$  – строка (направление  $OX$ ),  $j$  – столбец (направление  $OY$ ).

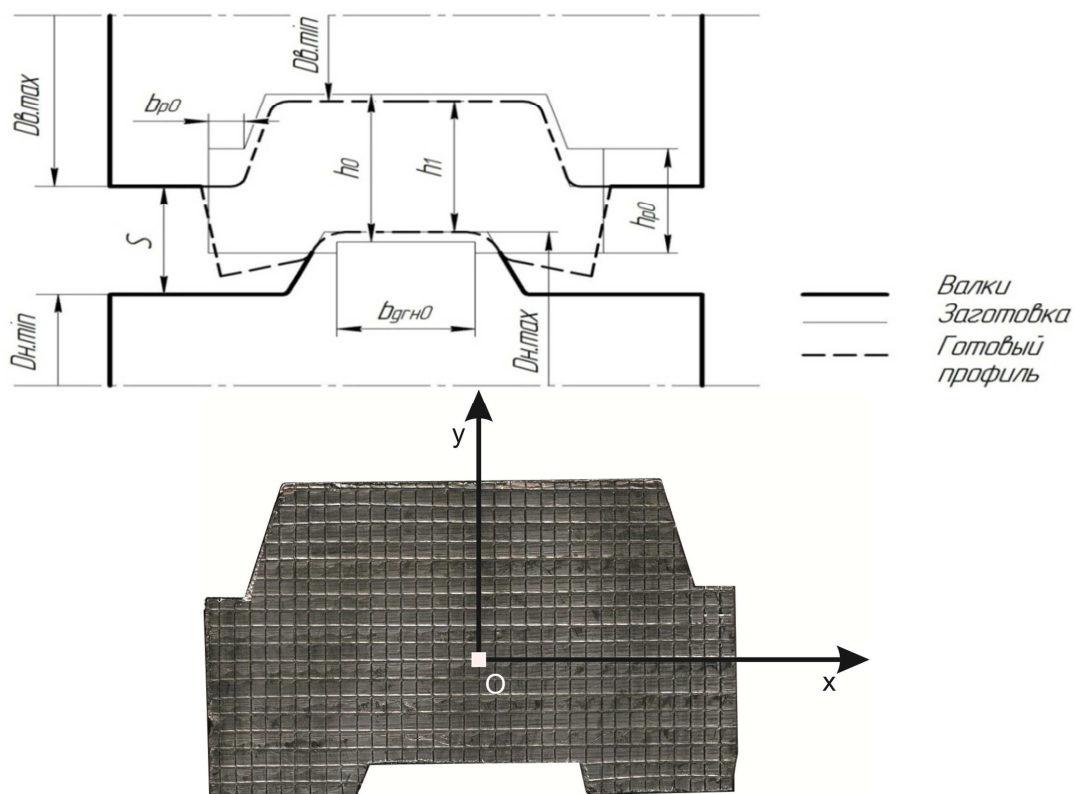


Рис. 1 – Схема деформации и заготовка с нанесенной сеткой

После измерения координат узлов сетки рассчитывали абсолютные перемещения узлов сетки:

$$u_x = x_1 - x_0; \quad (1)$$

$$u_y = y_1 - y_0, \quad (2)$$

где  $x_0$  и  $y_0$  – координаты узлов сетки до деформации;

$x_1$  и  $y_1$  – координаты узлов сетки после деформации.

Рассчитанные значения перемещения точек были использованы для определения поля перемещения в рассматриваемом очаге деформации. Длины стрелок на построенном поле перемещения (рис. 2) пропорциональны величинам перемещений.

Таблица. Параметры прокатки в теоретических и экспериментальных исследованиях

Тип исследования	Параметры прокатки			Размеры полосы до прокатки					Диаметры валков			
	$V_v$ , м/с	$\square \square \square$	$T$ , °C	$h_0$ , мм	$b_{gn0}$ , мм	$h_{p0}$ , мм	$b_{p0}$ , мм	$b_0$ , мм	$D_{в. max}$ , мм	$D_{в. min}$ , мм	$D_{н. max}$ , мм	$D_{н. min}$ , мм
Теоретическое исследование	0,5	26	1150	39,7	28,2	29	4,5	75,5	300	253,6	283	250
Экспериментальное исследование	0,5	26	16	39,6	30	29	4,8	75,5	300	253,6	283	250

Теоретический расчет выполнялся при помощи программного пакета ESV Deform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ, который в качестве математического аппарата использует метод конечных элементов для аппроксимации полей скоростей течения металла и вариационный принцип механики сплошных сред. Вариационное уравнение, использовавшееся для расчета методом штрафных функций имеет вид:

$$\delta \left[ \frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0, \quad (3)$$

где  $\mu$  – условная вязкость металла;  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $\sigma_\tau$  и  $v_\tau$  – полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента  $S$ ;  $t_1$  – штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости;  $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$  – скорость относительного изменения объема;  $t_2$  – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости;  $v_n$  – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке;  $\omega_n$  – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке. Общая методика моделирования изложена в работе [9].

### Результаты исследования.

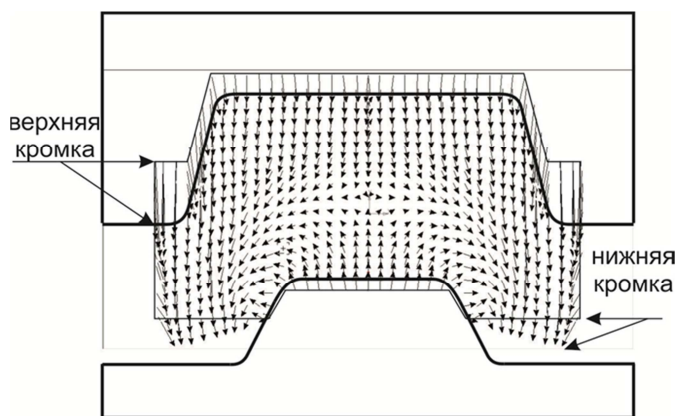


Рис. 2 – Поле перемещений в векторном виде

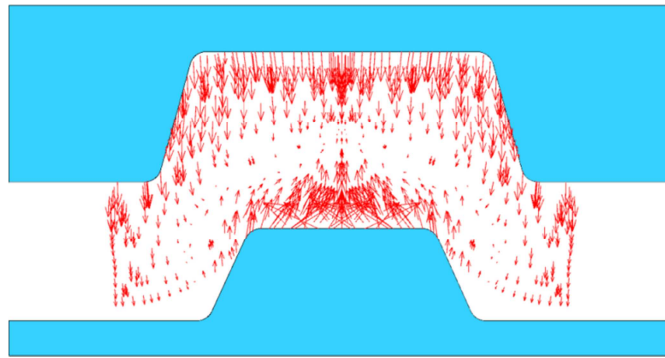


Рис. 3 – Поле скоростей в векторном виде

Из рисунков 2 и 3 видно, что полученное экспериментально поле перемещений частиц металла и теоретическое поле скоростей имеют качественно одинаковое направление течения металла. Это дает возможность по результатам теоретического расчета проанализировать поэтапно течение металла в очаге деформации при прокатке фасонной полосы в черновом шпунтовом калибре.

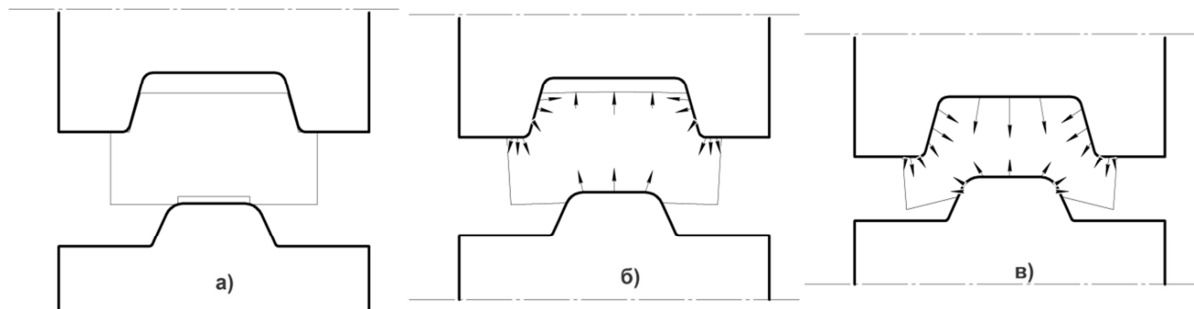


Рис. 4 – Этапы заполнения металлом очага деформации при прокатке фасонной полосы в шпунтовом черновом калибре:

а) захват полосы; б) промежуточный момент заполнения; в) установившийся процесс

Из рисунка 4 видно, что заполнение очага деформации разделено на три этапа: момент захвата полосы валками, промежуточный момент заполнения очага деформации и установившийся процесс.

В начальный момент захвата подката валками контакт происходит по трем участкам (рис.4, а): верхним ручьем валка по двум верхним кромкам замковых элементов и горизонтальным участком гребня нижнего ручья по нижней части подката. Верхний ручей валка в области стенки профиля не касается верхней части полосы и поэтому смещаемый горизонтальной плоскостью гребня нижнего валка объем металла стремится заполнить свободное место верхнего ручья.

В промежуточном этапе заполнения металлом очага деформации (рис.4,б) происходит увеличение площади контакта полосы с валками. На данном этапе заполнения начинает работать наклонная часть гребня нижнего ручья и наклонная часть калибра верхнего ручья. Одновременно происходит утяжка замкового элемента по высоте и ширине, что объясняется интенсивным перетеканием металла из замкового элемента в среднюю часть полосы, которая стремится заполнить свободное место верхнего ручья. В основном, данное перетекание происходит за счет смещения нижних кромок замковых элементов в направлении средней части полосы. В итоге происходит разворот боковых граней замковых элементов.

Третий этап заполнения (рис.4, в) начинается после контакта верхней части полосы с дном верхнего валка. Металл, который смещается дном калибра, формирует вытяжку

средней части профиля. При этом меня направление течения металла, смещенного наклонными гранями верхнего ручья, в сторону замковых элементов. На данном этапе происходит увеличение площади контакта металла с наклонными частями гребня нижнего ручья. Однако течению металла от боковых граней гребня нижнего валка в поперечном направлении препятствует вертикальное течение металла от верхнего ручья. Это объясняется большим смещенным объемом металла со стороны верхнего валка в области стенки и замковых элементов раската. Такое изменение направления течения металла в средней части полосы приводит к появлению двойной бочки (рис. 2) на боковой поверхности замковых элементов.

**Вывод.** Выполнено сопоставление теоретического и экспериментального исследования течения металла при прокатке фасонной полосы в черновом шпунтовом калибре. На основе теоретического исследования сделан поэтапный анализ течения металла в очаге деформации, который позволяет объяснить наблюдаемые на производстве явления.

**Список литературы:** 1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка: Справочник. Том 5./ Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев., В. П. Капелюшный – Днепропетровск: РИА «Днепр-Вал», 2004. – 375 с. 2. Мутьев М. С. Определение утяжки и вынужденного уширения при прокатке / М. С. Мутьев // Сб. «Обработка металлов давлением». М.: металлургиздат, 1952 3. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков / М. С. Мутьев – Москва: изд. «Металлургия», 1964. – 189 с. 4. Мутьев М. С. О разбивке калибра на элементы при прокатке с неравномерным обжатием / М. С. Мутьев // Труды конференции «Технический прогресс в технологии прокатного производства». М.: металлургиздат, 1960. – С.64 с. 5. Мельник С. Н. Развитие метода расчета калибровки валков для прокатки крупных шпунтовых профилей: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук : 05.03.05 / Мельник Сергей Николаевич. – Днепро-дзержинск, 2007. – 266 с. 6. Левченко Г. В. Исследование формоизменения металла при прокатке шпунтовых свай типа «Ларсен» / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, С. Н. Мельник // Металлургия и горно-рудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 48 – 52. 7. Ершов С.В. Особенности формирования замковых элементов профиля шпунтовой формы при прокатке в первом проходе первого формирующего калибра / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, В. В. Мосьпан, С. Ю. Гаврилин // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2011. – № 5. – С 36 – 39 8. Ершов С.В. Особенности формоизменения металла при прокатке шпунтовой сваи в формирующем калибре с двусторонним обжатием замковых элементов / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, В.В. Мосьпан, С. Ю. Гаврилин, Дудка Р. М. // Обработка металлов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – №1(30) – С.182 – 187. 9. Илюкович Б.М. Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2. / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Ершов – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2002.-485 с.

Надійшла до редколегії 15.10.2012

УДК 621.721.01

**Експериментальне та теоретичне дослідження течії металу при прокатці фасонної штаби в чорновому шпунтовому калібрі / Ершов С. В., Мельник С. Н., Гаврилін С. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 115-120. – Бібліограф: 9. назв.**

Шпунтові палі працюють як консольні балки, навантажені розосередженими силами. Основне навантаження сприймає полотно профілю. Сумарний вплив сил створює згинальний момент, під дією якого палі можуть деформуватися. Це приводить до роз'єднання паль в замкових елементах. Тому при виробництві шпунтів особливу увагу приділяють виконанню замкових елементів. Виконано зіставлення експериментально і теоретичних отриманих даних про перебіг металу в якісному вигляді. Показані відмінності течії металу в різні етапи заповнення металом вогнища деформації.

**Ключові слова:** деформація, калібр, замковий елемент, формозмінення.

Sheet piles act as cantilever beams loaded dispersed forces. Takes most of the load sheet profile. The net effect of forces creates a bending moment, under the influence of which may distort the pile. This leads to the separation of piles in interlocking elements. Therefore, the production of sheet piles, special attention given to the fulfillment interlocking elements. The comparison of experimental and theoretical data obtained on the metal flow in a qualitative way. The differences of the metal flow in the various stages of filling metal chamber deformation.

**Keywords:** strain gauge element of the castle, forming